Опыт комплексирования геоинформационных технологий при построении цифровых карт геофизических полей

III международная научно-практическая конференция “Подводные технологии - 2017”

***Дубовенко Ю.И.*, к.-ф.м.н., Институт геофизики НАН Украины,** nemishayeve@ukr.net
***Патока В.В.*, к.б.н., Немешаевский агротехнический колледж,** patokavladislava@ukr.net
***Кузьминец Н.П., д.т.н.*, Национальный Транспортный Университет;** kuzminecmp@ukr.net
***Кузьминец О.Н.*, к.с.-х.н., Немешаевский агротехнический колледж;** kuzminecmp@ukr.net
***Степаненко Т.С., доц.*, Национальный Транспортный Университет**

Постановка проблемы. Объёмы геофизических измерений сокращены на 2 порядка, усилия направлены на создание цифровых банков данных из имеющихся материалов съёмок. Завершившийся переход к компьютерному моделированию геологических участков в специализированных пакетах программ (замена физических моделей и матриц полей их аналитическими аппроксимациями) не отменил роль карт как средства визуализации данных и инструмента качественного анализа. И хотя в целом этот переход к компьютерному моделированию **запрещает** решение задач на основании снятия значений с карт изолиний, до сих пор основная методика интерпретации обращается к этому способу обработки карт. Поскольку первичные данные (журналы наблюдений) недоступны, интерпретация осуществляется на основе фрагментов новых измерений, и результатов оцифровки существующих бумажных карт. Но результаты оцифровки неоднозначны вследствие сильной зависимости от избранного метода интерполяции карт изолиний измеренного поля. Необходим отбор методов для достоверного отображения исходной информации, чему и посвящён данный анализ…

Изучены ***методы сглаживания*** изолиний: соприкасающийся параболический сплайн, сплайн Безье, кубический сплайн - по регулярной прямоугольной сетке. На рисунках – их реализации: рис. 1 – построение изолиний м-дом соприкасающегося параболического сплайна; результирующая кривая проходит не через узлы изолинии, полученные интерполяцией, а через дополнительные узлы - середины отрезков интерполяционной кривой. Рис. 2 – построение изолиний (по тем же данным) сплайном Безье; рис. 3 – между методами есть различия, и определив их величину, можно делать вывод о точности методов, сфере их применения.

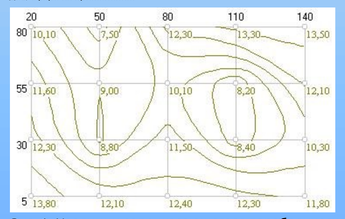


Рис. 1. Изолинии соприкасающегося параболического сплайна

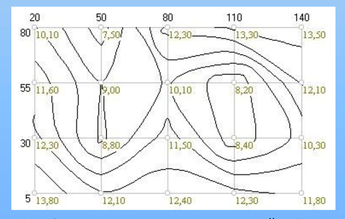
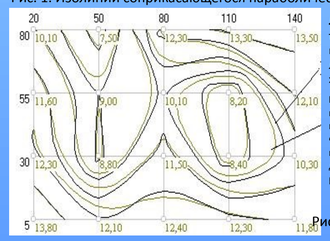


Рис. 2. Изолинии с применением сплайна Безье



Линейная интерполяция обеспечивает непрерывность функции, но в узлах интерполяции появляются изломы, искажающие восприятие кривой. При замене кривой кусочно-линейным контуром её гладкость будет воспроизводиться тем лучше, чем меньше различия между положением касательной к кривой в узле и хордами. Эти различия служат критериями оценки точности воспроизводства.

Гладкость кривой обеспечим, воспользовавшись интерполяцией дугами окружностей: пусть любые 2 соседних узла интерполяции принадлежат участку кривой, для которого направление выпуклости одно в каждой точке (сегменты парабол). В интерполяции *кубическими кривыми* следует определить точку перегиба, если имеется, использовать её в качестве одного из узлов интерполяции. В этом способе построения интерполяционной дуги окружности сохраняется ***непрерывность*** составной кривой, но **нарушается** непрерывность ***первой производной*** в узлах интерполяции – видны изломы в этих узлах…

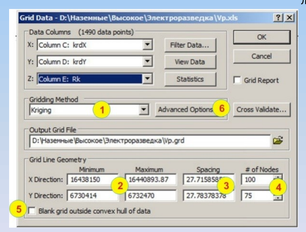
Рис. 3. Сплайн Безье и соприкасающийся параболический сплайн

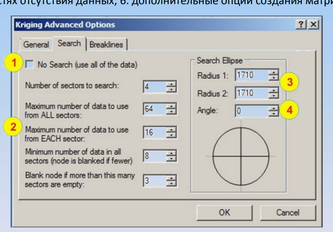
Цифровка геофизических карт в Surfer разными методами

Диапазон значений поля **3.6**-**7.6** мГал, амплитуда поля – **11.2** мГал, интервал изолиний – **0.2** мГал, размер участка **13×14** км, шаг грида – **1** км, **183** точки измерений. Оцифровано с рис. „карта изолиний гравитационного поля Сибирской площади в редукции Буге, σ= 2.3 г/см^3“, с. 197 в работе: *Степанова И. Э.* Линейные трансформации аномальных потенциальных полей с использованием *S*-аппрокси-маций // Геофиз. журн. – 2007. – **29**, № 5. – С. 191-200.

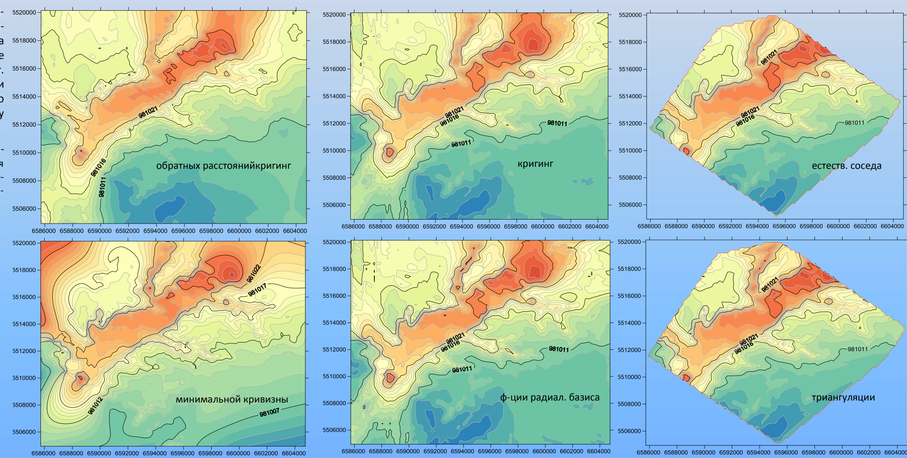
Сравнение результатов оцифровки набора данных разными методами показало: к точному решению, сравнимому с ручным введением изолиний на основе опыта и интуиции не приближается ни один из методов гридднинга. Приемлемой точностью, при прочих равных условиях, обладает метод ***функции радиального базиса*** для сложных контуров. Популярный метод *крайгинга* может считаться таковым в случае *точной настройки* его параметров на характеристики объекта.

Адекватное отображение сети наблюдений. Пусть сеть наблюдений – система параллельных линий, шаг наблюдений на которых меньше, чем расстояния между линиями. Это обычная система наблюдений в геофизической (геохимической, топографической) практике. Для создания достоверной матрицы грида необходимы дополнительные опции, важнейшие обозначены красными цифрами в желтых кружках: 1. метод создания матрицы; 2. координаты матрицы; 3. размер ячейки матрицы; 4. количество столбцов и строк матрицы; 5. бланкование матрицы в областях отсутствия данных; 6. дополнительные опции создания матрицы.

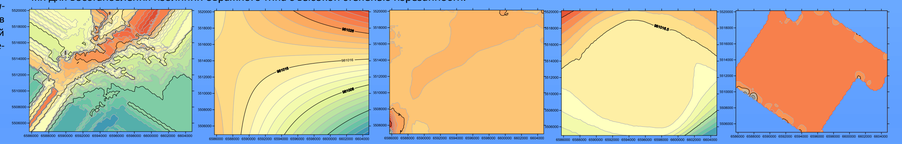




Корректное графическое отображение поверхности базируется на построении интерполяционной поверхности …. методом кусочно-линейной интерполяции (или дугами окружностей). При кусочно-линейной интерполяции промежуток кривой между 2 точками изолинии разбивается на *n* интервалов. Заменив все участки кривой между каждыми 2 соседними точками хордами, мы заменяем кривую ломаной с вершинами в узлах разбиения. Критерии длины шага разбиения различны, их выбор диктуется целями интерполяции: минимизация отклонения кривой от интерполяционной ломаной; гладкость воспроизводимой кривой; и др.



Реальные значения поля ведут себя, в отличие от указанные *левее* модельных, значительно сложнее. Примером тому служит детальная съёмка УВ-перспективного участка Охтырской площади, аномалии силы тяжести в редукции Буге, работы Полтавской гравиметрической партии, 2004 год (800 пунктов, амплитуда аномалий ~25 мГл). Будучи отстроенными разными методами интерполяции наблюдённого поля, дают значительные различия в распределении аномальных характеристик полей. А ведь за каждым «завитком» кроется аномалия: ложная или истинная?.. Здесь изображения, полученные методами кригинга и функции радиального базиса, практически совпадают, и тоже относится к паре «триангуляции - естественного соседа». А вот методы ближ. соседа, полиномиальные, скользящего среднего, Шепарда (см. ниже) оказались практически непригодными для восстановления изолиний овражного типа с высокой степенью изрезанности.



Выход из тупика неоднозначной визуализации поля – в двухэтапной предварительной обработке исходных данных геофизических полей. Нужна: 1. ***точная*** настройка параметров гридднинга на каждую конкретную съемку; 2. ***управляемая*** фильтрация данных. Изучению последней посвящена вторая часть доклада…

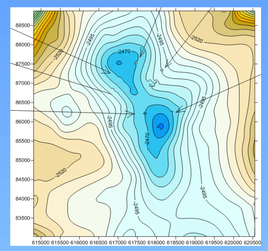


Рис. 2. нежелательные локальные эффекты.

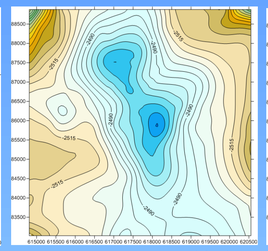


Рис. 3. Сглаживание Gaussian User-defined, 3×3.

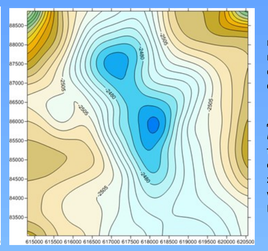


Рис. 4. Результат фильтра Moving Average , 9×9.

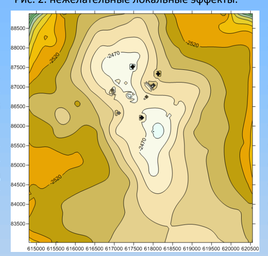


Рис. 5. Результат фильтра Mean Removal

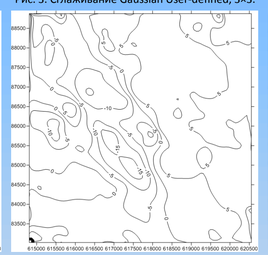


Рис. 6. Результат фильтра Southwest

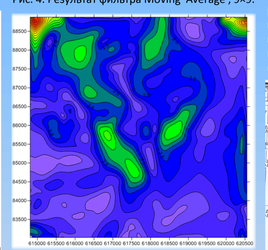
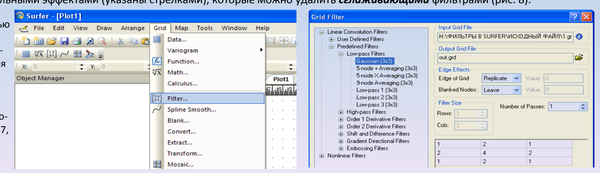


Рис. 7. Результат фильтра Standart Deviation

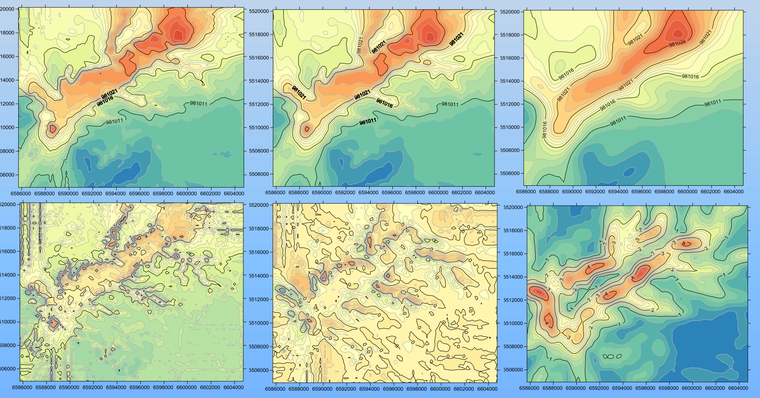
Нелинейные фильтры подразделяются по назначению на **4** типа. В них веса в диалоговом окне не отображаются, но незримо присваиваются, определяются с помощью простых функций от значений в соседних узлах. В фильтрах этой группы можно менять размеры области соседних узлов, за исключением 4 фильтров типа Compass Gradient Filters, в которых они предустановлены. В фильтре Threshold Averaging (Пороговое осреднение) задаётся дополнительный параметр – пороговое значение, превышая которое, узел не учитывается в расчётах. На рис. 2 – карта с нежелательными локальными эффектами (указаны стрелками), которые можно удалить ***сглаживающими*** фильтрами (рис. 8).

Результат применения ВЧ фильтра Mean Removal с противоположной целью подчеркивания локальных деталей – рис. 5. Эффект выделения локальных аномалий наглядно виден в сравнении карт на рис. 5 и рис. 2. Результат применения (рис. 6) ВЧ фильтра Southwest из типа Gradient Directional Filters, для выделения областей быстрого изменения значений функции – участков с большим наклоном (градиентом). Результат работы нелинейного фильтра Standart Deviation из типа Moment Statistics Filters, для вычисления *стандартного отклонения* значений функции в соседних узлах (рис. 7). При сопоставлении аномальных зон, закрашенных зеленым цветом, на карте на рис. 7, с исходной картой (рис. 2), видно, что указанные зоны отвечают участкам с максимальными градиентами.



Эти примеры демонстрируют возможности Surfer в коррекции карт и в анализе особенностей поверхностей в случае **корректной настройки** параметров фильтрации. Выбор фильтров для решения тех или иных задач, подбор оптимальных параметров фильтрации, осуществляется методом подбора.

Применив те же фильтры к полевому набору данных, указанному слева (данные Полтавской гравиметрической партии, 2004 год), в итоге получим (рис. 9):



Пересчёт данных в произвольных точках к регулярной сетке – задача нетривиальная. Если набор исходных данных формально обработать, получить значения в сетке, соответствуют они реальности? Пример 1: **3** скважины в вершинах равностороннего треугольника со сторонами **20** м, достоверность расчёта значения УГВ в центре фигуры – высока. А если сторона треугольника **1** км? А если считать значение УГВ в **10** км от скважин? Если геофизик не согласен с расчётными данными, нужно корректировать результаты – математическая модель не может адекватно отразить сложности реальных процессов. Пример 2: строить карту параметра по значениям в *N* точках. Какой метод аппроксимации выбрать? 10 методов Surfer дадут 10 разных результатов, как показано выше. Нужно уточнить, какие это данные: УГВ, отметки поверхности земли, замеры радиоактивности, уровень солености, результаты геохимических проб, распределения петрофизических характеристик или данные каротажа? Для ***разных*** физических параметров среды нужно использовать ***разные*** методы и решать **вспомогательные эвристические задачи**.

Набор методов интерполяции позволяет подобрать оптимальную модель для решения задачи, получить цифровую модель поверхности и оценить качество исходных данных и результатов. А это предпосылки для решения обратных задач. В примере со скважинами можно проводить выявление "подозрительных" данных (ошибки измерений и некачественные замеры), определять места, где излишек/недостаток наблюдательных пунктов, т.е. – ***выбрать оптимальную конфигурацию сети наблюдений***, обеспечивающую необходимое качество получения информации с помощью интерполяции. В Surfer решение таких обратных задач обеспечивает расчёт и построение карт *погрешностей* интерполяции, моделирование с использованием вариограмм.

Обратные задачи решают методом перебора вариантов (и опыта). Важна интерактивная коррекция исходных данных и анализ результатов благодаря Object Manager и перерасчёту модели без закрытия окон, в которых задают исходные параметры. Быстродействие алгоритмов, расчёт цифровой модели поверхности, визуализация с использованием многослойных карт, методы обработки цифровых моделей, получение векторных карт скоростей (расчёт производных двумерной функции) оцифрованной поверхности – предпосылки для успешного применения Surfer для создания надёжных **цифровых карт геофизических параметров** и их трансформант.

Значение в узле выходной сетки - функция значения в узле и значений в соседних узлах входной сетки, взятых с весами. Соседние узлы - узлы прямоугольного участка входной сетки, центрированного относительно узла входной сетки. Ширину и высоту участка определяет количество столбцов и строк. Фильтр “скользит” от узла к узлу, пока все узлы не обработает. Параметры фильтрации: **2** Edge Effects (Краевые эффекты): Edge of Grid (Край сетки), Blanked Nodes (Бланкированные узлы) для устранения краевых эффектов ; Filter Size (Размеры фильтра) – кол-во строк и столбцов входного файла, соседних к узлу, в котором будет определяться новое значение функции; веса, присваиваемые значениям в узлах соседних строк и столбцов; параметр Number of Passes (Количество проходов) для многократной фильтрации получаемых на выходе сеток.

Помимо *сглаживающих* НЧ фильтров имеются ВЧ фильтры (вычитают региональный фон), фильтры повышения контрастности, фильтры определения и усиления краёв, и др. - **64** фильты в **2** группах: фильтры ***линейной свертки*** (Linear Convolution Filters) и ***нелинейные*** (Nonlinear Filters). Фильтры *линейной свертки* рассчитывают *средневзвешенные* значения по значениям *в соседних узлах* входной сетки. Разница между этими фильтрами – в размере и форме массива соседних узлов и специфике весов. Фильтры с параметрами пользователя – 4 НЧ фильтра (Low-pass Filters), позволяют задать размеры фильтра, General User-defined позволяет задать размеры фильтра и веса. Это фильтр скользящего среднего и фильтры, в нем веса зависят от *удаления*, определяются разными зависимостями. **Встроенные фильтры**: НЧ фильтры (Low-pass Filters) сглаживают локальные отклонения; ВЧ фильтры (High-pass Filters) уменьшают фоновые составляющие и подчеркивают локальные детали; фильтры с производными (Order Derivative Filters) для обнаружения горизонтальных и вертикальных краев; фильтры сдвига и отличия (Shift and Difference Filters); фильтры направления градиентов (Gradient Directional Filters) вычисляют производные по **8** направлениям; чеканящие фильтры (Embossing Filters) для определения краев аномалий и т.д.

Новые средства оцифровки карт. И последняя проблема, которую мы хотим затронуть в докладе: средства привязки координат и оцифровки карт изолиний, имеющих разрыв контуров (нарушение сплошности линий). Решить эту проблему средствами только Surfer — невозможно. Но за последнее время в Институте геофизики НАНУ разработаны одним из авторов доклада начала стратегии создания цифровых баз данных гравиметрии в Украине [1]. Среди первоочередных шагов указывается обобщение и предобработка исходных данных грави– и магнитометрии. В качестве ядра базы данных предложена использовать открытую ГИС Quantum GIS и СУБД PostgreSQL. Для процедуры оцифровки бумажных карт следует задействовать технологию [2], которая использует в качестве исходной информации не обычные ***карты изолиний***, а совершенно новый тип цифровой инфомации в виде электронного ***журнала измерений***. Т.е., переводится не бумажная карта изолиний — в цифровую карту изолиний, со всеми ошибками и недостатками, но карта фактажа (рис. 10) - в цифровую грид-карту аномалий (рис. 11), готовую к обработке в спец. среде интерпретатора аномалий [3].

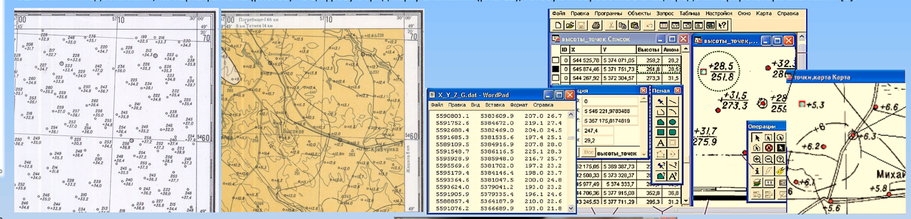


Рис. 10. Фрагмент гравиметрической карты СССР М-35 -XXX масштаба 1:200000: слева – высоты пунктов наблюдений, справа – аномалии Буге (σ = 2.3 г/см^3).

Ссылки:

1. *Дубовенко Ю.И.* Замечания о стратегии создания цифровых баз данных гравиметрии в Украине // Геоинформатика. – **20-15**, № 4(56). – С. 65-70.
2. *Якимчик А.И.* Технология оцифровки карт фактического материала на основе программного обеспечения MapInfo Professional и CorelDraw // Геофиз. журн. – 2010. – 32, № 3. – С. 112–124.
3. *Старостенко В.И., и др.* Интерактивный программный комплекс Isohypse для построение 3-мерных геолого-геофизических моделей и его практическое использование // Геофиз. журн. – 2016. – **38**, № 1. – С. 30–42.

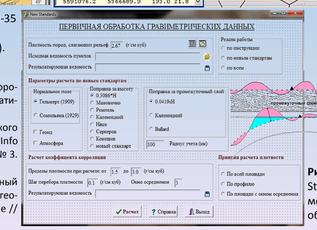


Рис. 12. Интерфейс программы New Standards [1] для предобработки гравиметрических измерений и его физическое обоснование.

Рис 11. Фрагмент интерфейса MapInfo для оцифровки фактических значений гравианомалий по новой процедуре: ввод значений аномалий во время оцифровки карт наблюдений [2].